

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
28. August 2003 (28.08.2003)

PCT

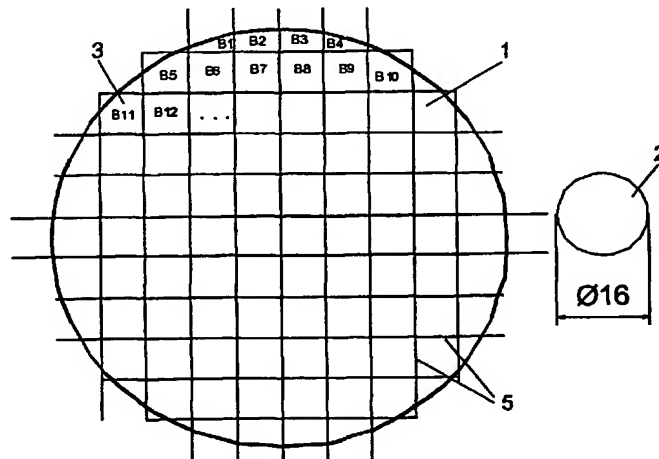
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 03/070427 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: B24B 13/06, 49/00, 51/00 (72) Erfinder: KIONTKE, Sven; Weg der Freundschaft 12, 07613 Hartmannsdorf (DE). DÖHLER, Hermann; OT Wildorf 6, 07778 Dornburg (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP03/01749 (74) Anwalt: KERN, Ralph, M.; Hansastrasse 16, 80686 München (DE).
- (22) Internationales Anmeldedatum: 20. Februar 2003 (20.02.2003) (81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (25) Einreichungssprache: Deutsch (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 102 07 379.1 21. Februar 2002 (21.02.2002) DE (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): ASPHERICON GMBH [DE/DE]; Wildenbruchstrasse 15, 07745 Jena (DE). (84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR RE-GRINDING AND POLISHING FREE-FORM SURFACES, ESPECIALLY ROTATIONALLY SYMMETRICAL ASPHERICAL OPTICAL LENSES

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM NACHSCHLEIFEN UND POLIEREN VON FREIFORMFLÄCHEN, INSBESONDERE VON ROTATIONSSYMMETRISCHEN ASPHÄRISCHEN OPTISCHEN LINSEN



(57) Abstract: The invention relates to a method for re-grinding and polishing free-form surfaces, especially rotationally symmetrical aspherical optical lenses by tools. According to the inventive method, the virtual levelling of a coarsely pre-ground lens, for example, is calculated by interferometric measurement and by calculation with a desired form; pressure, rotational speed and sojourn time of the tools are controlled by means of said virtual levelling and the surface of the lense, for example, is divided up into partial areas. The partial areas correspond to the size of the tools. A zeroized approximation is calculated for the control of the tools. Said zeroized approximation enables the interaction of the partial areas to be estimated. By taking into account the estimated interaction, a sojourn time for each tool on each partial area is calculated as a function of pressure and rotational speed of the tool for each partial area, using a linear equation system and the tools are controlled accordingly. The invention also relates to tools and tool arrangements in addition to especially precise aspherical lenses.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii) für alle Bestimmungsstaaten
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii) für alle Bestimmungsstaaten
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US

**Veröffentlicht:**

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

**(57) Zusammenfassung:** Es handelt sich um eine Verfahren zum Nachschleifen und Polieren von Freiformflächen, insbesondere von rotationssymmetrischen asphärischen, optischen Linsen durch Werkzeuge, wobei ein virtueller Abtrag von einer grob vorgeschliffenen z. B. Linse durch interferometrische Vermessung und Vergleich mit einer Sollform berechnet wird, Andruck, Rotationsgeschwindigkeit und Verweildauer der Werkzeuge aufgrund des virtuellen Abtrags gesteuert werden und dazu die Oberfläche der z. B. Linse in Teilbereich unterteilt wird, wobei die Teilbereiche der Grösse der Werkzeuge entsprechen, eine nullte Näherung für die Steuerung der Werkzeuge errechnet wird, anhand der nullten Näherung virtuell die Wechselwirkung der Teilbereiche untereinander abgeschätzt wird und unter Berücksichtigung der abgeschätzten Wechselwirkung eine Verweilzeit jedes Werkzeugs auf jedem Teilbereich unter Berücksichtigung von Andruck und Rotationsgeschwindigkeit des Werkzeugs für jeden Teilbereich durch ein lineares Gleichungssystem errechnet wird und die Werkzeuge entsprechend gesteuert werden. Ebenfalls Gegenstand der Erfindung sind besondere Werkzeuge und Werkzeuganordnungen sowie besonders genaue asphärische Linsen.

Verfahren zum Schleifen und Polieren von Freiformflächen, insbesondere von rotationssymmetrischen asphärischen optischen Linsen

**Beschreibung:**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Schleifen und Polieren von Freiformflächen, insbesondere von rotationssymmetrischen asphärischen optischen Linsen.

Im Gegensatz zu bisher vielfach eingesetzten sphärischen Linsen besitzen diese asphärischen Linsen spezielle optische Eigenschaften, die theoretisch das physikalische Optimum darstellen. Das bedeutet in der Praxis, daß die mit diesen asphärischen Linsen realisierten Abbildungen wesentlich lichtstärker und schärfer sind. Sie vermeiden Fehler wie die sphärische Abberation. Ähnliches gilt für die noch unregelmäßigeren Flächen, die hier als Freiformflächen bezeichnet werden. Sie können konische, wellenartige, zylindrische oder andere Formen annehmen. Die möglichen Einsatzgebiete sind bei ihnen noch größer.

Es besteht folglich die dringende Notwendigkeit, diese Oberflächen kostengünstig zu fertigen. Dies ist derzeit nicht möglich, da sich alle im Einsatz befindlichen Verfahren auf die Fähigkeiten erfahrener Bediener und / oder den Einsatz von Produktionsautomaten stützen, die nur mit sehr kleinen Werkzeugen arbeiten. Die Durchmesser dieser Werkzeuge sind meist nur etwa ein Zehntel so groß wie die der Werkstücke. Aus diesem Grund sind die bisher schleifend und polierend hergestellten Asphären sehr teuer.

Diese Erfindung setzt an diesen Problempunkten an. Zum einen werden das Schleifen und das Polieren und hierbei im besonderen die korrespondierenden Korrekturdurchgänge nicht mehr von Hand, sondern durch ein Verfahren nach den Ansprüchen 1 fortfolgend (ff) gesteuert. Zum anderen sorgen die in den Ansprüchen 23 ff beschriebenen Werkzeuge für einen wesentlich höheren, aber trotzdem genau steuerbaren und reproduzierbaren Abtrag. Die Erfindung ermöglicht damit wesentlich geringere Fertigungskosten.

Es gab bereits mehrere Versuche diese Problematik zu lösen, unter anderem durch das Verfahren des Patentes JP9066464. Bisher jedoch ohne Erfolg. Bei dem in dieser Druckschrift offenbarten Verfahren wird die zu bearbeitende Oberfläche in Bereiche eingeteilt. Anschließend werden alle diese zusammen in einem linearen Gleichungssystem berechnet.

In der Praxis ist es jedoch unmöglich, ein solches Gleichungssystem in Kombination mit effektiven Werkzeugen für die gesamte Freiformfläche zu lösen. Darauf weist auch das in der besagten Drucksschrift beschriebene Beispiel durch seine extreme Einfachheit hin. Der hier dargestellte Fehler ist in dem Sinne gar keiner, da nur eine fast ebene Fläche bearbeitet wird.

Folglich ist es nicht möglich, mit diesem Verfahren die Genauigkeit der Oberfläche durch entsprechende Steuerung der Werkzeuge zu steigern.

Gegenstand der Erfindung ist es, diese Nachteile zu vermeiden.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die Freiformfläche (1 oder 4) in Bereiche (Fig.1 und Fig.2), z.B. von der Größe des Werkzeuges entsprechend, aufgeteilt wird. Jeder dieser Bereiche enthält dann noch immer eine Vielzahl von Stellen, die in die Berechnung einfließen und wird einzeln mit einem separaten linearen Gleichungssystem gelöst. Da sich die Bereiche gegeneinander resultierend aus der Breite des Bearbeitungswerkzeuges beeinflussen, muß man deren Wechselwirkung berücksichtigen. Zu diesem Zweck fließt in das jeweilige lineare Gleichungssystem eine nullte Näherung ein, welche diese Wechselwirkung abschätzt. Diese Wechselwirkung zeigt auch das auf der Fläche (4) im Bereich B8 positionierte Werkzeug (2), welches trotzdem B7 bearbeitet und damit beeinflusst.

Weiterhin werden alle Werkstück- und Werkzeugspezifika wie die Rotationsgeschwindigkeiten berücksichtigt. Die aus der Vielzahl der Gleichungssysteme resultierende Vielzahl der Lösungsmengen werden wieder kombiniert und zur Steuerung des Werkzeuges während des Schleifens oder Polierens eingesetzt.

In Abhängigkeit von der erforderlichen Oberflächengenauigkeit und den vorhandenen Fehlern im Vergleich zum Durchmesser des verwendeten Werkzeuges sind unterschiedliche Größen der Bereiche sinnvoll. Auf Grund der Wechselwirkung der Bereiche untereinander in Abhängigkeit von der Werkzeugbreite ist es sinnvoll, daß die Bereiche die gleiche oder die doppelte Breite des Werkzeuges aufweisen (siehe auch Fig. 2).

Durch die Kontrolle der das Schleifen und das Polieren bestimmenden Einflussfaktoren besteht die Möglichkeit, den Abtrag auf der Oberfläche per Verweildauer und/oder per Rotationsgeschwindigkeit und/oder per Anpreßdruck des Werkzeuges und/oder per Rotationsgeschwindigkeit des Werkstückes zu steuern.

Durch den Einsatz des Verfahrens wird es möglich, gerade nur so viel Material von der Oberfläche abzutragen, daß die Sollfläche danach so entsteht, daß der tiefste Punkt der

unkorrigierten (Ist-) Fläche (Fig. 5 Minima der Kurve 7), da dieser nahezu nicht bearbeitet wurde, immer noch Teil der erzeugten Sollfläche ist. Praktisch wurde so wenig wie möglich Material abgetragen, aber trotzdem die Sollform realisiert. Es wurde der minimal notwendige Abtrag realisiert. Dies ist ein entscheidender Aspekt zur Reduzierung der Bearbeitungszeit. Bisher wird meist so lange poliert, bis irgendwann die Mindestgenauigkeit erfüllt wird. Das hat zur Folge, daß eher so viel Material wie in Fig. 6 Kurve 13 dargestellt abgetragen und die Bearbeitung damit unnötig verlängert wird.

Im Gegensatz zu beliebigen Freiformflächen weisen rotationssymmetrische Freiformflächen eine Regelmäßigkeit in Form Ihrer Rotationssymmetrie auf. Es ist unerheblich, wie die Linse innerhalb Ihrer Symmetrieachse verdreht wird, der Querschnitt der Oberflächenform wie beispielsweise in Fig. 4 Oberfläche (1) bleibt gleich. Werden selbige Oberflächen mit Verfahren, welche die Rotationssymmetrie ausnutzen (siehe ebenfalls Fig. 4), bearbeitet, so sind auch die Fehler der Oberfläche rotationssymmetrisch verteilt. Dann ist es möglich, die Steuerung des Abtrages nur radial durchzuführen. Für die Steuerung einer solchen Bearbeitung wird das vorgestellte Verfahren in eine eindimensionale Form überführt. Der virtuelle Abtrag und die Verteilung der Bereiche beschränkt sich auf den eindimensionalen, radialen Bereich (siehe Fig. 5). Die Bearbeitung geschieht dann unter Rotation von Werkzeug und Werkstück.

Da bisher keine Verfahren existieren, die den Einsatz großer Werkzeuge ermöglichen und gleichzeitig die Oberflächengenauigkeit erhöhen bzw. auf ein gewünschtes Maß steigern, war es bisher immer notwendig, mehrfach nachzubearbeiten und wiederholt nachzumessen.

Dieses Verfahren ermöglicht erstmals simultan den Einsatz großer Werkzeuge bei gleichzeitiger Steigerung der Oberflächengenauigkeit in einem Bearbeitungsdurchgang. Beide Aspekte in Kombination mit der Kontrolle aller die Bearbeitung beeinflussenden Größen verringern die Produktionszeit auf zehn und weniger Minuten (vergleiche hierzu auch das Ausführungsbeispiel).

Zum Teil werden sehr hohe Anforderung an die Genauigkeit der Oberflächen gestellt. Trotzdem sollen die Fertigungskosten gering gehalten werden. Bisher ist das nicht möglich. Bereits bei vergleichsweise großen und breiten Fehlern wird mit kleinen Werkzeugen

gearbeitet, woraus sehr lange Fertigungszeiten resultieren. Dazu kommt, daß zwischen den Bearbeitungsdurchgängen, sowohl bei der Verwendung von gleichen als auch von anderen, gewechselten Werkzeugen, wiederholt die Oberfläche vermessen wird. Dies erfordert durch Ein- und Ausspannen und die erforderliche Meßzeit einen hohen Aufwand, der die Produktionskosten stark mehrt.

Durch die werkzeugspezifische Verwendung des virtuellen Abtrages dieses Verfahrens, ist das Ergebnis einer ersten Bearbeitung mit einem größeren Werkzeug auch ohne Nachmessung bekannt (siehe Fig. 7 Kurve 10). Darauf aufbauend kann zur weiteren Steigerung der Genauigkeit auf Basis desselben Verfahrens unter Anwendung eines anderen für das kleinere Werkzeug spezifischen virtuellen Abtrages eine Steuerung für die sich anschließende Bearbeitung mit diesem kleineren Werkzeug berechnet werden. Die Gesamtbearbeitung ist wesentlich kürzer, als wenn von Beginn an nur mit dem zuletzt verwendeten, kleineren Werkzeug bearbeitet worden wäre. Die Einsparung des Nachmessens ermöglicht weitere Kostensenkungen.

Um die Einsatzbereiche des Verfahrens zu vergrößern, werden neben nicht überlappenden Bereichen auch überlappende Bereiche zugelassen. Die in Fig. 10 gezeigten Bereiche B1, B2, B3 ... B9 überlappen paarweise zu 50 %. Beispielsweise überlappt B3 zur Hälfte mit B4 und dieser wiederum zur Hälfte mit B5. Es existieren jeweils 16 gemeinsame Stützstellen bzw. Berechnungspunkte.

Eine Ausweitung der Überlappung der Bereiche bis zu dem Extremfall, daß sich benachbarte Bereiche nur noch um einen Wert unterscheiden, ergibt um so bessere Steuerungen für die Korrektur der Oberfläche. Für das Beispiel in Fig. 10 würde das bis zu 132 Bereiche (B1, B2, ..., B132) zur Folge haben.

Bezüglich der Überlappung der Bereiche gilt das entsprechende auch für den zweidimensionalen Fall. Die Anzahl der Bereiche nimmt hier quadratisch zu, da die Überlappung der Bereiche in zwei Dimensionen möglich ist.

Mit diesem Verfahren ist es erstmals möglich, asphärische Glaslinsen schleifend und polierend innerhalb von 20 min herzustellen.

Insbesondere konkave Linsen stellen sehr hohe Ansprüche an die Steuerung während der Bearbeitung. Es ist unter Anwendung dieses Verfahrens erstmalig möglich, konkave Linsen mit einem best fit Krümmungsradius von weniger 50 mm innerhalb von 40 min. schleifend und polierend mit einer pv-Genauigkeit von besser als 600 nm herzustellen.

Zur entscheidenden Verringerung der Bearbeitungszeiten ermöglicht dieses Verfahren den Einsatz von Werkzeugen (2) mit Durchmessern von einem Achtel bis einem Viertel des Durchmessers des Werkstückes (Fig. 11) und ist trotzdem in der Lage die Oberfläche (1) zu korrigieren (siehe auch im Ausführungsbeispiel). Im Vergleich mit bisherigen Werkzeugen mit der Größe von etwa einem Zehntel wird allein durch den Einsatz dieser Werkzeug eine mehr als Versechsfachung des Abtrages und eine entsprechende Verkürzung der Bearbeitungszeit möglich.

Bestimmend für den Einsatz von Werkzeugen sind die vorhandenen Fehler (7 in Fig. 12), die zum Erreichen der geforderten Genauigkeit entfernt werden müssen. Allgemein bekannt ist, daß die zur Korrektur verwendeten Werkzeuge nur so breit sein dürfen, wie der schmalste Fehler, hier 20 mm, der entfernt werden muß. Mit diesem Verfahren ist es möglich, Werkzeuge einzusetzen, die doppelt so breit sind resp. den doppelten Durchmesser von 40 mm aufweisen, wie die zu korrigierenden Fehler. Die Fehler werden wie bisher korrigiert, jedoch in einem viertel der Zeit, da sich die Bearbeitungsfläche mit dem im Vergleich zu bisher doppelt so breiten Werkzeug vervierfacht.

Um einen über die Zeit konstanten Abtrag zu gewährleisten, müssen die Bearbeitungsbedingungen gleichbleibend sein. Deshalb soll die Polier- oder Schleifolie (14 aus Fig. 13), das mit der Bearbeitungsoberfläche in Kontakt tretende Material des Werkzeuges (2), eine homogene Struktur besitzen, die frei von Blasen, Rissen oder ähnlichem ist. Auch die Zusammensetzung des Materiales selber soll makroskopisch gleichmäßig sein.

Damit aber trotzdem eine gleichmäßige Polier- oder Kühlmittelzufuhr (16) gewährleistet werden kann, werden senkrechte Kanten 15 (Fig. 13) in dieses homogene Material des Polier- oder Schleifpad's eingebracht, durch die das Polier- oder Kühlmittel unter der gesamten Werkzeugfläche annähernd gleichmäßig wirken kann.

Um die Bearbeitungsgeschwindigkeit weiter zu steigern, ist es notwendig, die Abtragsfläche zu vergrößern. Eine Vergrößerung der Werkzeuge ist jedoch nicht möglich, da dann die notwendige Genauigkeit nicht mehr erreicht werden kann.

Dieses Problem umgeht man, in dem mehrere Werkzeuge (2) gleichzeitig auf der Freiformfläche (1 oder 4) zur Bearbeitung eingesetzt werden (Fig. 14 und 15). Die erreichbare Genauigkeit ist ebenso hoch wie bei der Verwendung nur eines Werkzeuges dieser Größe.

Ein reproduzierbarer Abtrag wird hierbei im wesentlichen dann erzielt, wenn die Werkzeuge senkrecht auf der Oberfläche aufliegen. Fig. 16 verdeutlicht eine Anordnung mehrerer Werkzeuge, die alle tangential auf der Oberfläche aufliegen.

Bei der Bearbeitung rotationssymmetrischer Freiformflächen ist die Bewegung jedes der Werkzeuge entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren entlang einer radialen Strecke vorteilhaft.

Sollen besonders viele Werkzeuge gleichzeitig die Fläche bearbeiten, ist es vorteilhaft, wenn die Bewegung der Werkzeuge entlang nicht-radialer Strecken erfolgt.

Sind die Werkzeuge besonders angeordnet, so ist eine Bearbeitung der Fläche auch dann möglich und sinnvoll, wenn sich die Werkzeuge nicht bewegen.

Es ist in diesem Fall anzustreben, daß bei rotierender Freiformfläche die Werkzeuge so angeordnet werden, daß die gesamte Freiformfläche bearbeitet wird, was in dem Beispiel aus Fig. 14 der Fall ist.

Nur durch die Anordnung mehrerer Werkzeuge ist es möglich, Freiformflächen, die weder sphärisch noch plan sind, mit mehr als 5 Prozent gleichzeitig bearbeiteter Fläche der gesamten Freiformfläche so zu bearbeiten, daß der Prozeß beherrschbar bleibt und seinen korrigierenden Charakter behält.

Der Einsatz mehrerer Werkzeuge wird damit verbessert, daß jedes der einzelnen Werkzeuge separat gesteuert wird.



Beim Einsatz vieler Werkzeuge ist es, insbesondere wenn das Handlingsystem der Werkzeuge für mehrere Linsen universell sein soll, einfacher, wenn jedes der Werkzeuge einen beweglichen Fuß aufweist, der die Bedingung, daß das Werkzeug tangential auf der Freiformfläche aufliegt auch bei nicht ganz korrekter Zustellung gewährleistet.

Die Steuerung mehrerer Werkzeuge auf einer Freiformfläche (1 oder 4) ist insbesondere auf kleinen Flächen technologisch sehr anspruchsvoll. Werden jeweils mehrere Werkzeuge (2) in mechanischen Verbunden zusammengefasst, ist bei verringerter feinmechanischer Komplexität eine Steuerung des Abtrages immer noch in ausreichendem Maße möglich. (Fig. 17 und 18)

Die einzelnen Werkzeuge können, wie in Fig. 18 zu sehen, in einem stabförmigen Verbund (18) mechanisch gebündelt werden.

Ebenfalls sind runde Verbunde (17) eine Möglichkeit Einzelwerkzeuge (2) zu kombinieren. Sie sind im Sinne der tangentialen Auflage des Werkzeuges speziell auf einer runden rotationssymmetrischen Freiformfläche (1) von Vorteil.

Selbige Verbunde werden unter Berücksichtigung des veränderten Abtrages, wie Einzelwerkzeuge mit dem Verfahren nach Anspruch 1 ff gesteuert. Der virtuelle Abtrag muß entsprechend angepaßt werden.

#### **Ausführungsbeispiel:**

Das Ausführungsbeispiel betrifft eine asphärische optische Linse, die korrekturpoliert werden soll. Zu diesem Zweck wird die Linse interferometrisch vermessen. Die vor der Bearbeitung gemessene Fehlerverteilung zeigt Fig. 3. Da das vorangegangene Auspolieren der Linse, wie in Fig. 3 sehr gut zu sehen ist, bereits auf rotationssymmetrische Weise stattfand, sind die auf der Oberfläche vorhandenen Fehler rotationssymmetrisch verteilt. Währenddessen sowohl die Linse als auch das Werkzeug rotieren, fährt das Werkzeug vom Rand der Linse auf radialem Weg mit senkrechter Ausrichtung zu deren Oberfläche zur Linsenmitte (Fig. 4). Die Korrektur der Fehler soll entlang dieses Weges durch die Verweilzeit gesteuert werden.

Die gesamte Fehlerbetrachtung zur Korrektur dieser Linse wird im Gegensatz zu allgemeinen Freiformflächen auf die radiale Strecke begrenzt. Zur vereinfachten Darstellung wird hier ein etwas anschauliches Beispiel gewählt. Die Anwendung des Verfahrens bei allgemeinen Freiformflächen bedeutet lediglich eine Transformation in zwei Dimensionen, also die Verwendung einer Fläche anstatt nur einer (radialen) Strecke.

Der Fehler der gesamten, vermessenen Fläche wird zunächst auf den radialen Durchschnitt gemittelt. Das Ergebnis zeigt Fig. 5 in Kurve 7. Die innen liegende 0, der Anfang der Abszissenachse, bezeichnet den Linsenmittelpunkt, das rechts liegende Ende den Linsenrand. Dargestellt ist nur der Fehler der Oberfläche mit einem peak to valley (pv) von ca. 1700 nm. Das gesamte Verfahren arbeitet in diesem Beispiel auf 130 Stützstellen, auf denen gerechnet wird. Für jede Stelle ist der virtuelle Abtrag bekannt. Darauf aufbauend wird jeweils eine Verweilzeit erzeugt und zur Steuerung des Abtrages während der Bearbeitung genutzt. Jede dieser Stützstellen wurde mit Meßwerten der Fig. 3 erzeugt. Diese 130 Stützstellen entsprechen bei diesem Beispiel einer Strecke von 20 mm.

Der virtuelle Abtrag des Werkzeuges wird auf Basis eines Footprints für die gesamte Oberfläche berechnet.

Nun wird die radiale Arbeitsstrecke von 20 mm in Bereiche eingeteilt (Fig. 5). Das Werkzeug hat eine Breite von 33 Punkten, etwa 5 mm. Die Bereiche sollen die Breite des Werkzeuges haben. Damit ergeben sich 4 Bereiche B1, B2, B3 und B4. Für jeden dieser Bereiche wird jetzt ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst, welches den Fehler der Oberfläche in diesem Bereich gemindert um die mittels der Nullten Näherung abgeschätzte Beeinflussung der angrenzenden Bereiche (für B1: B2 / für B2: B1, B3 / für B3: B2, B4 / und für B4: B3) und den virtuellen Abtrag an jeder der zu dem Bereich gehörenden 33 Stellen enthält.

Als Ergebnis entstehen die in Fig. 8 dargestellten Verweilzeiten 11. Die aus den vier einzelnen Gleichungssystemen stammenden Verweilzeiten an den jeweils 33 Stellen wurden hier wieder zusammengefügt. Diese Verweilzeiten bedingen den prognostizierten Abtrag, der sich aus der Summe der Kurven 8 und 9 aus Fig. 7 zusammensetzt. Die resultierende, prognostizierte Fehlerverteilung der Oberfläche zeigt Kurve 10.

Die Bearbeitung der Oberfläche mit dieser Verweilzeitsteuerung benötigte 5,48 min. Die radial gemittelte Verteilung der Oberfläche nach der Korrektur zeigt Fig. 9 in Kurve 12.

Zwischen den Stützstellen 0 und 70 wurde eine Genauigkeit von besser 150 nm erreicht. Von der Stelle 70 bis zum Rand der Linse konnte noch eine pv-Genauigkeit von pv 400 nm erreicht werden. Damit entspricht die prognostizierte Fehlerverteilung bis auf kleine Abweichungen im Betrag der tatsächlich nach der Bearbeitung entstandenen Fehlerverteilung.

Das Beispiel zeigt, daß das Verfahren in der Lage ist, bei Verwendung von großen Werkzeugen schwierige Oberflächenfehler in extrem kurzer Zeit zu korrigieren. Wesentlichen Anteil an der Verkürzung der Fertigungszeit hat neben dem großen Werkzeug (Durchmesserverhältnis Werkzeug : Werkstück / 1 : 8) die Fähigkeit des Verfahrens genau so viel abzutragen, daß nur der tatsächlich vorhandene Fehler abgetragen wird. Mit den bisher verwendeten Verfahren wurde meist sehr viel mehr Abtrag realisiert, so daß die Bearbeitung sehr viel mehr Zeit in Anspruch nahm. Fig. 6 zeigt eine Kurve 13, die veranschaulicht, wie viel Abtrag in solchen Fällen zu viel abgetragen wird. Die Bearbeitungszeit würde in dem Fall auf 20 min steigen. Entscheidend ist auch, daß dieses Ergebnis in nur einem Bearbeitungsdurchgang ohne wiederholtes Nachmessen und Nachbearbeiten erreicht wurde.

#### **Beschreibung der Bilder:**

- Fig. 1: Einteilung einer runden Freiformfläche (1) in Bereiche (3) bei Anwendung des Werkzeuges (2) mit Durchmesser 16 mm (Draufsicht auf die Freiformfläche)
- Fig. 2: Einteilung einer rechteckigen Freiformfläche (4) in durch die Bereichsgrenzen (5) voneinander abgegrenzte Bereiche (3), die der Größe des Werkzeuges (2) entsprechen (Draufsicht auf die Freiformfläche)
- Fig. 3: Zweidimensionale Fehlerverteilung (6) einer rotationssymmetrischen optischen Linse (Asphäre)
- Fig. 4: Bewegungsabläufe bei der Bearbeitung einer rotationssymmetrischen optischen Linse (1) mit einem (Polier-)Werkzeug (2) (Seitenansicht / Schnittdarstellung)
- Fig. 5: Radialer Durchschnitt der Fehlerverteilung (7) auf der rotationssymmetrischen optischen Linse aus Fig. 4; dies entspricht dem minimal notwendigen Abtrag

- Fig. 6: Vershobener radialer Durchschnitt der Fehlerverteilung (13) auf der rotationssymmetrischen optischen Linse aus Fig. 4; dies entspricht dem bisher oft realisierten Abtrag
- Fig. 7: Veranschaulichung des Verfahrens mit Ist-Zustand des Oberflächenfehlers (7), dem prognostizierten Abtrag (Summe aus 8 und 9) und dem prognostizierten verbleibendem Fehler nach der Bearbeitung (10)
- Fig. 8: Die durch das Verfahren bestimmten Verweilzeiten (11).
- Fig. 9: Der auf der mit diesen Verweilzeiten (11) bearbeiteten Oberfläche verbleibende Oberflächenfehler (12)
- Fig. 10: beispielhafte Verteilung von zu 50 % überlappenden Bereichen (B1, ..., B9) innerhalb eines radialen Durchschnitts einer rotationssymmetrischen Fläche
- Fig. 11: Größenverhältnisse zwischen Werkzeug und Werkstück 1:8 und 1:4
- Fig. 12: Größenvergleich zwischen dem schmalsten Fehler der Fehlerverteilung () und dem Werkzeug (2)
- Fig. 13: Werkzeug mit adaptierter polier- oder Schleiffolie (14) mit senkrechten Kanten (15)
- Fig. 14: Anordnung von mehreren Werkzeugen (2) auf der runden Freiformfläche (1)
- Fig. 15: Anordnung von mehreren Werkzeugen (2) auf der rechteckigen Freiformfläche (4)
- Fig. 16: Anordnung mehrerer Werkzeuge (2), die tangential d.h. mit senkrechter Orientierung auf der Freiformfläche (1) aufliegen.
- Fig. 17: Anordnung von runden mechanischen Verbunden (17) von Werkzeugen (2) auf einer runden Freiformfläche (1)
- Fig. 18: Anordnung von stabförmigen mechanischen Verbunden (18) von Werkzeugen (2) auf einer rechteckigen Freiformfläche (4)

#### **Zahlen an den Bildern:**

- 1 = runde Freiformfläche
- 2 = Werkzeug
- 3 = durchnummerierten Bereiche (B1, B2, ...)
- 4 = rechteckige Freiformfläche
- 5 = Bereichsgrenzen
- 6 = zweidimensionale rotationssymmetrische Fehlerverteilung

7 = radialer Durchschnitt der zweidimensionalen rotationssymmetrischen Fehlerverteilung

8/9 = prognostizierter Abtrag

10 = prognostizierter verbleibender Fehler

11 = bestimmte Verweilzeiten

12 = nach der Bearbeitung auf der Oberfläche tatsächlich verbleibender Restfehler

13 = zu großer, bisher oft abgetragene Fehler

14 = Polier- oder Schleifolie aus homogenem Material

15 = senkrechte Kanten für Polier- oder Kühlmittelzufuhr

16 = Polier- oder Kühlmittel

17 = mechanische Verbunde von Werkzeugen in runder Ausführung

18 = mechanische Verbunde von Werkzeugen in stabförmiger Ausführung

10

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Schleifen und Polieren von Freiformflächen, insbesondere von rotationssymmetrischen asphärischen, optischen Flächen wie Linsen oder Spiegel, durch ein Werkzeug oder mehrere Werkzeuge, wobei ein virtueller Abtrag von einer vorbearbeiteten, vorzugsweise vorgeschliffenen optischen Fläche durch vorzugsweise interferometrische Vermessung und Vergleich von festgestellter Istmit der Sollform berechnet wird, Andruck, Rotationsgeschwindigkeiten und Verweildauer bzw. Fortbewegung des Werkzeugs oder der Werkzeuge aufgrund des virtuellen Abtrags gesteuert werden und dazu die Oberfläche der optischen Fläche in Teilbereiche unterteilt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine nullte Näherung für die Steuerung des Werkzeugs oder der Werkzeuge errechnet wird, anhand der nullten Näherung virtuell die Wechselwirkung der Teilbereiche untereinander abgeschätzt wird und unter Berücksichtigung der abgeschätzten Wechselwirkung ein Verweilzeitverlauf des Werkzeugs oder für jedes Werkzeug für jeden Teilbereich unter Berücksichtigung von Andruck, Rotationsgeschwindigkeit und Poliermittelverhalten des Werkzeugs bzw. der Werkzeuge für jeden Teilbereich durch ein lineares Gleichungssystem errechnet wird und das Werkzeug oder die Werkzeuge entsprechend gesteuert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche der Größe des Werkzeugs oder eines der Werkzeuge entsprechen.

3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Teilbereiche der doppelten Größe des Werkzeugs oder eines der Werkzeuge entsprechen.
- 5 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verweildauer des Werkzeugs oder eines der Werkzeuge zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
- 10 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotationsgeschwindigkeit des oder eines Werkzeugs zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
- 15 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Werkstücks zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
- 20 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Anpressdruck des Werkzeugs oder eines der Werkzeug zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
- 25 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass zu einer Korrektur der Oberfläche nur der minimal notwendige Abtrag abgetragen wird.
- 30 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8 für rotationssymmetrische Freiformflächen, insbesondere asphärische Linsen oder Spiegel, **dadurch gekennzeichnet**, dass der virtuelle Abtrag in eine ein-dimensionale Form überführt wird, und die grob vorgeschliffene z.B. Linse, beim Schleifen und Polieren rotiert.
- 35 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass zu einem Erreichen einer gewünschten Oberflächenform-Genauigkeit nur einmal geschliffen oder poliert wird, was nur eine kurze Bearbeitungszeit von ca. zehn oder weniger Minuten bedingt.

- 5 11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit oder ohne bevorzugt interferometrischen Nachmessung oder eine andere Nachmessung eine geringe Anzahl von Malen des Schleifens oder Polierens mit jedem Mal verkleinerten Werkzeugen erfolgt, was höchste Genauigkeit mit sich führt und eine Zeitersparnis gegenüber einmaligem Schleifen oder Polieren mit den kleinsten Werkzeugen gewährleistet.
- 10 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche nicht überlappen.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche etwas überlappen.
- 15 14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche sehr stark überlappen.
- 20 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche so stark überlappen, dass sie sich nur noch um einen Wert oder wenige Werte unterscheiden.
- 25 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche unterschiedliche Größen haben.
17. Asphärische Glaslinse mit einer Genauigkeit von besser als 600 Nanometer, geschliffen und poliert innerhalb von ca. 20 Minuten.
- 30 18. Asphärische Glaslinse mit einer Genauigkeit besser als 600 nm mit konkaver Oberfläche, mit BestFit-Krümmungsradius kleiner als 50 mm innerhalb einer Zeit von ca. 40 Minuten geschliffen und poliert.
- 35 19. Korrekturwerkzeug zur Bearbeitung rotationssymmetrischer Freiformflächen, insbesondere asphärischer Linsen oder Spiegel,



19. Korrekturwerkzeug zur Bearbeitung rotationssymmetrischer Freiformflächen, insbesondere asphärischer Linsen oder Spiegel, welches rotiert und mit dem Ziel eingesetzt wird, die Oberfläche zu korrigieren und radial verschiebbar ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Größen-Durchmesserhältnisse von Werkzeug zu z. B. Linse ein Achtel bis ein Viertel beträgt.

20. Werkzeug zur Bearbeitung von rotationssymmetrischen Freiformflächen, insbesondere asphärischen Linsen oder Spiegel, welches rotiert und radial verschiebbar ist, gekennzeichnet durch eine Größe doppelt so breit wie der schmalste Fehlerberg auf der Freiformfläche, welcher entfernt werden soll.

21. Werkzeug mit einer Polier- oder Schleiffolie aus insbesondere Polyurethan, gekennzeichnet durch ein Polier- oder Schleiffolienmaterial ohne Bläschen und ohne Einkerbungen oder sonstige Inhomogenitäten.

22. Werkzeug analog Anspruch 21 mit absichtlich eingearbeiteten Ritzen mit steilen bis senkrechten Kanten zur besseren Polier- und Kühlmittelzufuhr, wobei die Ritzen groß genug sind, dass sie nicht mit Polier- oder Kühlmittel verstopft werden.

23. Werkzeuganordnung, welche mehrere die Freiformfläche, ausgenommen eine Planfläche, gleichzeitig bearbeitende Werkzeuge aufweist.

24. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einzelwerkzeuge mit senkrechter Orientierung auf der Oberfläche aufliegen.

25. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23 oder 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich jedes der Einzelwerkzeuge auf einer radialen Strecke einer rotationssymmetrischen Freiformfläche bewegt.

5 26. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23 oder 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich jedes der Einzelwerkzeuge auf einer nicht-radialen Strecke der Freiformfläche bewegt.

10 27. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23 oder 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die Einzelwerkzeuge nicht auf der Freiformfläche bewegen.

15 28. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23 bis 27, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einzelwerkzeuge so auf der Freiformfläche verteilt sind, dass bei rotierender Freiformfläche die gesamte Freiformfläche bearbeitet wird.

20 29. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** die gleichzeitig bearbeitete Fläche mehr als fünf Prozent der Freiformfläche mit Ausnahme der Planfläche und der sphärischen Fläche beträgt.

25 30. Werkzeuganordnung nach Anspruch 23 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einzelwerkzeuge einzeln gesteuert werden.

30 31. Werkzeug nach Anspruch 23, gekennzeichnet durch einen beweglichen Fuss an seiner Bearbeitungsseite, welcher sich so einstellt, dass das Werkzeug tangential auf der Freiformfläche aufliegt.

32. Werkzeuganordnung nach einem der Ansprüche 23 bis 31, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einzelwerkzeuge in Verbunden vorliegen.

33. Werkzeug nach Anspruch 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verbunde stabförmig sind.

34. Werkzeug nach Anspruch 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verbunde rund sind.

35. Werkzeuganordnung nach einem der Ansprüche 32 bis 34, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verbunde der Einzelwerkzeuge über die Freiformfläche positioniert und wie ein Einzelwerkzeug bewegt werden.

36. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** beim Vor- bzw. Auspolieren der Freiformfläche nach dem Schleifen die vorhandene Genauigkeit erhalten bleibt oder verbessert wird.

37. Werkzeuganordnung nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Einzelwerkzeuge nach einem der Ansprüche 4 bis 7 gesteuert werden.

1/9

Fig.1:

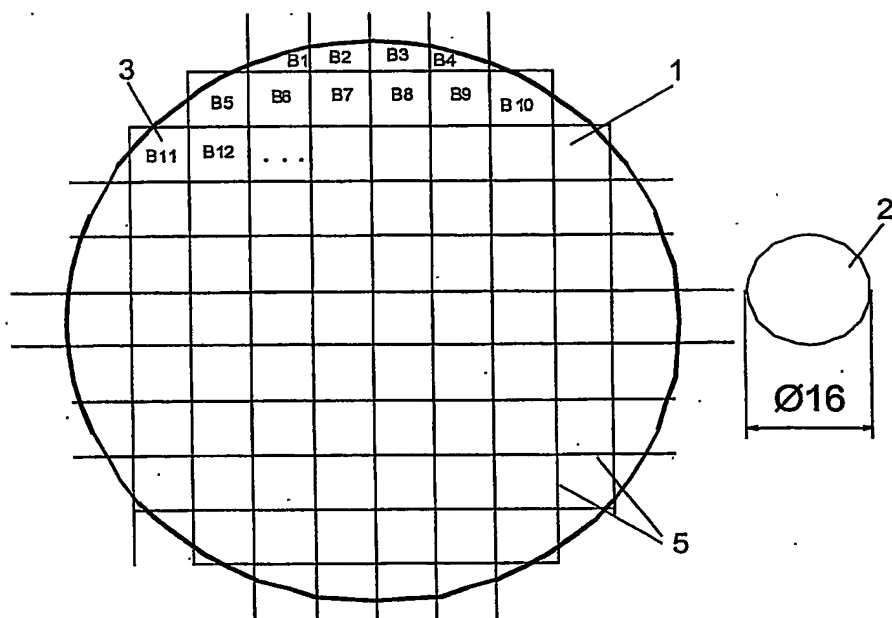
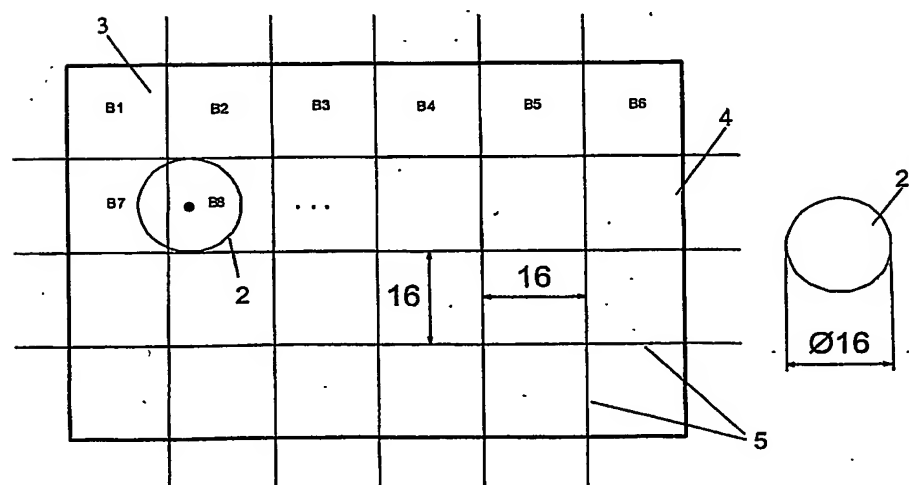


Fig.2:



2/9

Fig. 3:

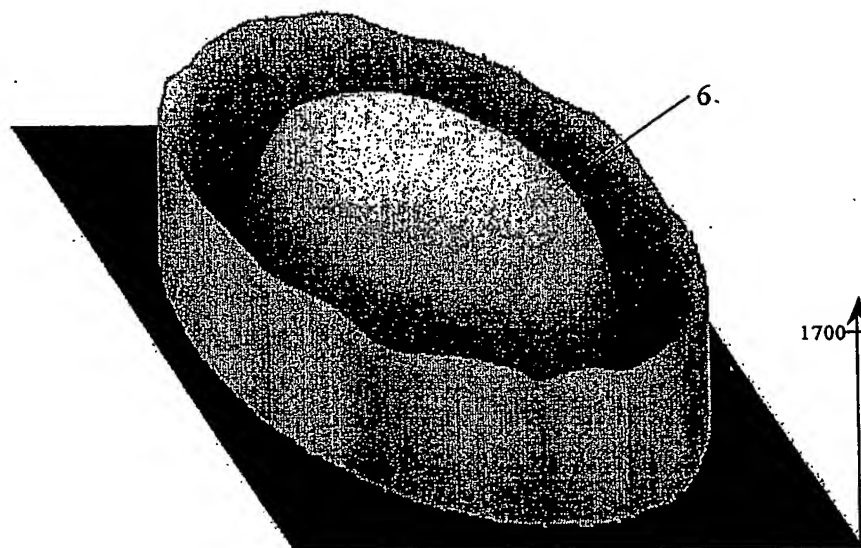


Fig. 4:

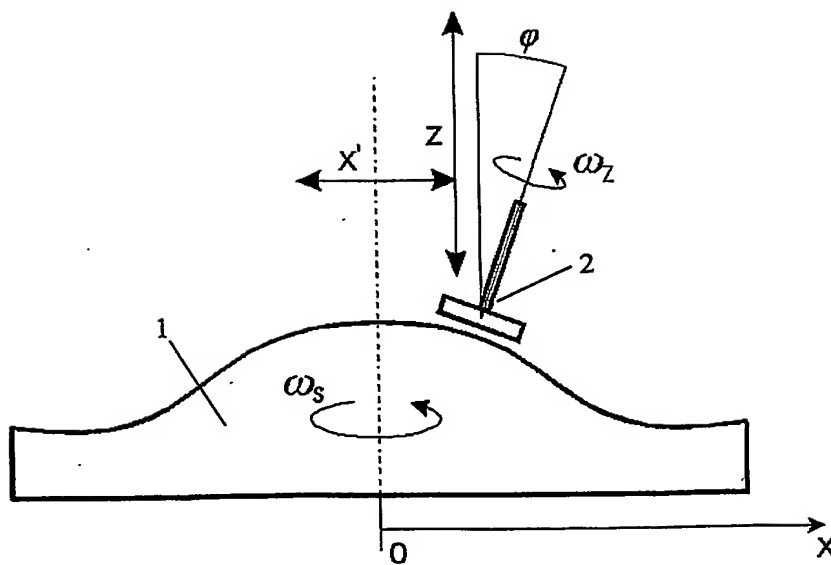


Fig. 5:

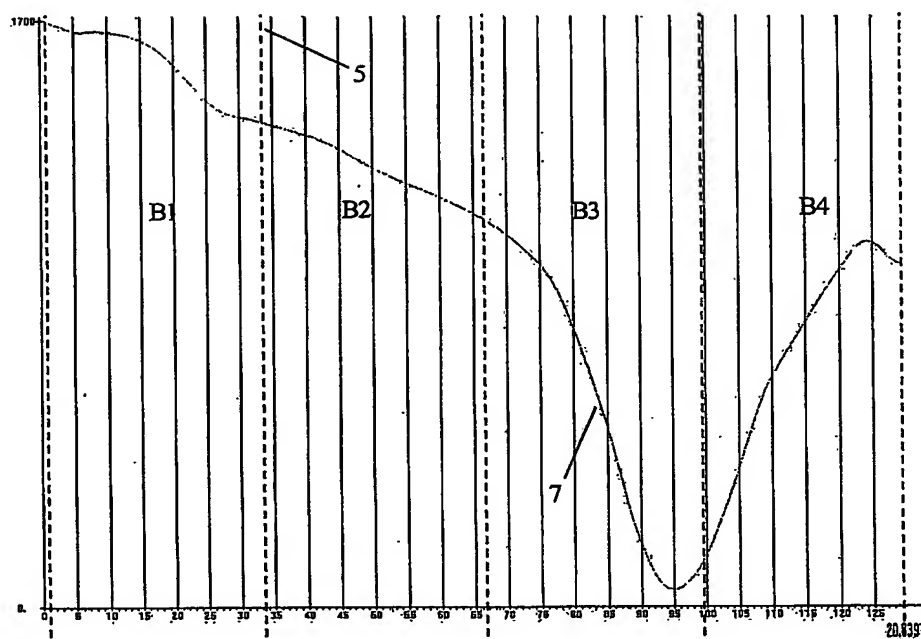
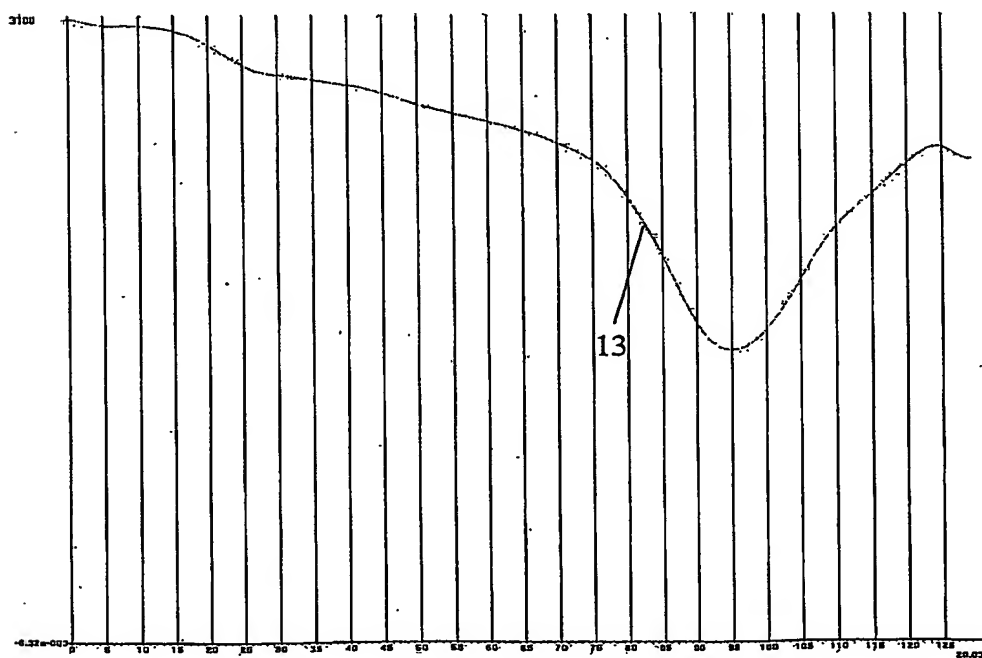


Fig. 6:



4/9

Fig. 7:

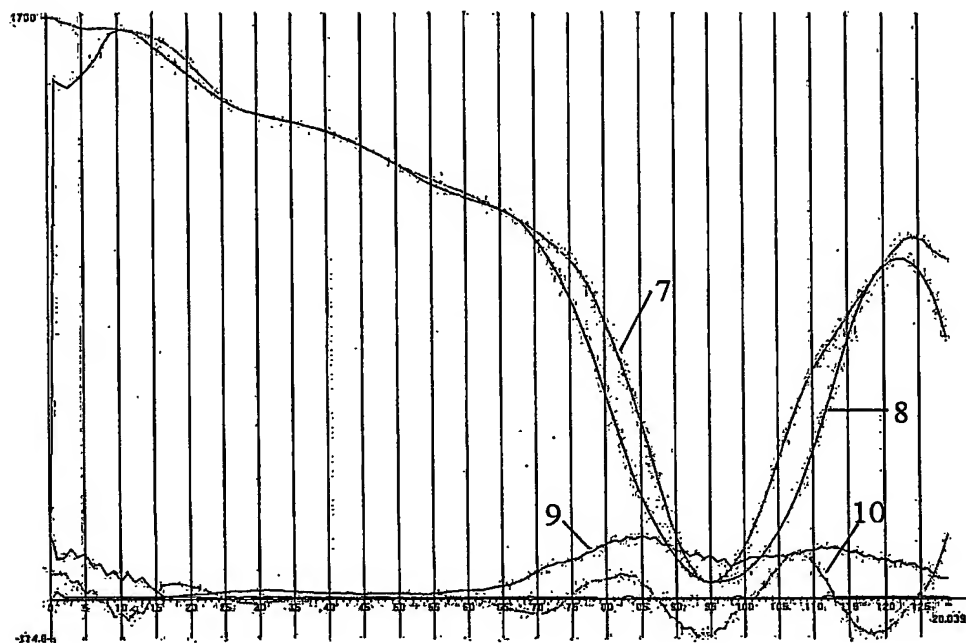


Fig. 8:

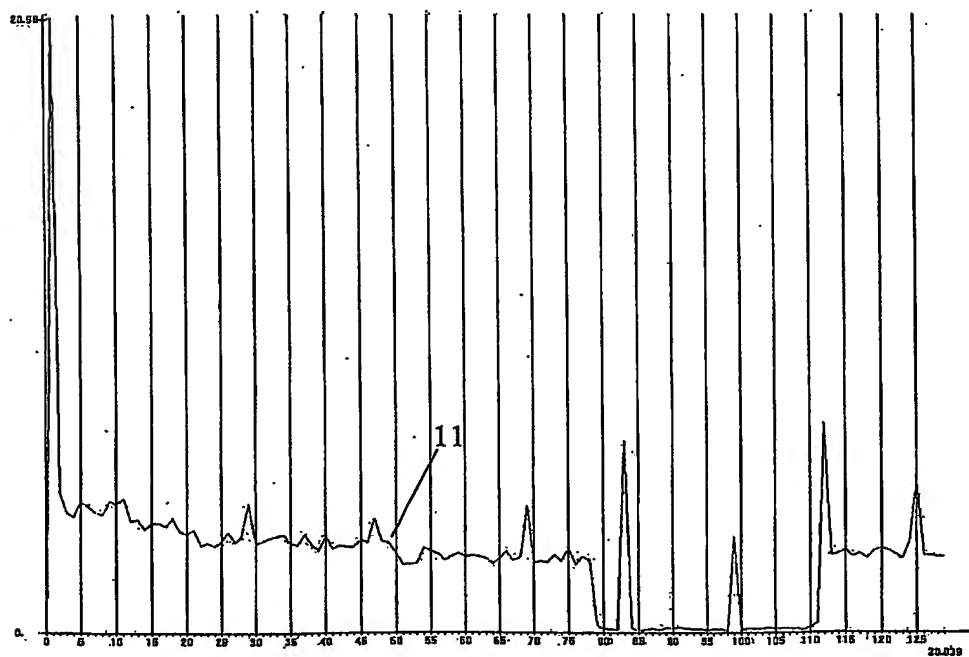


Fig. 9:

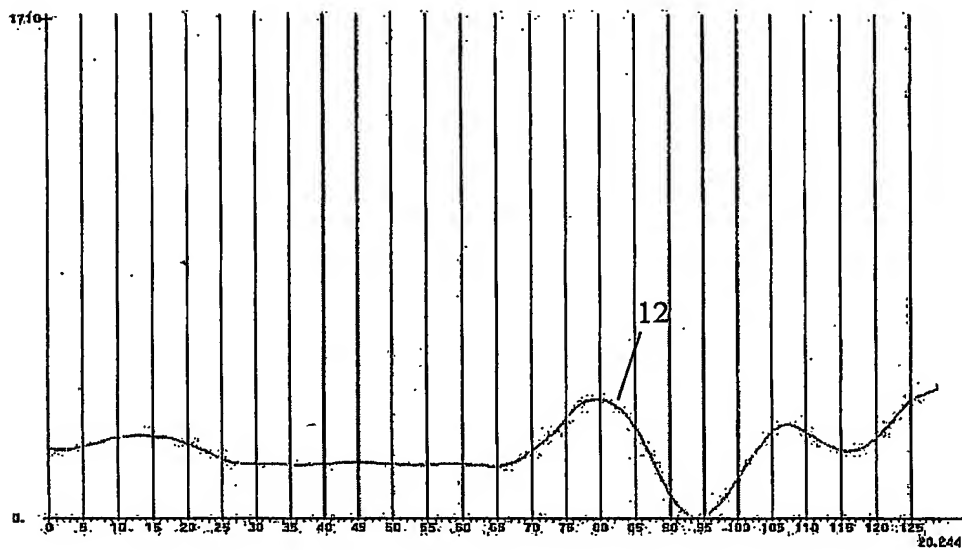


Fig. 10:

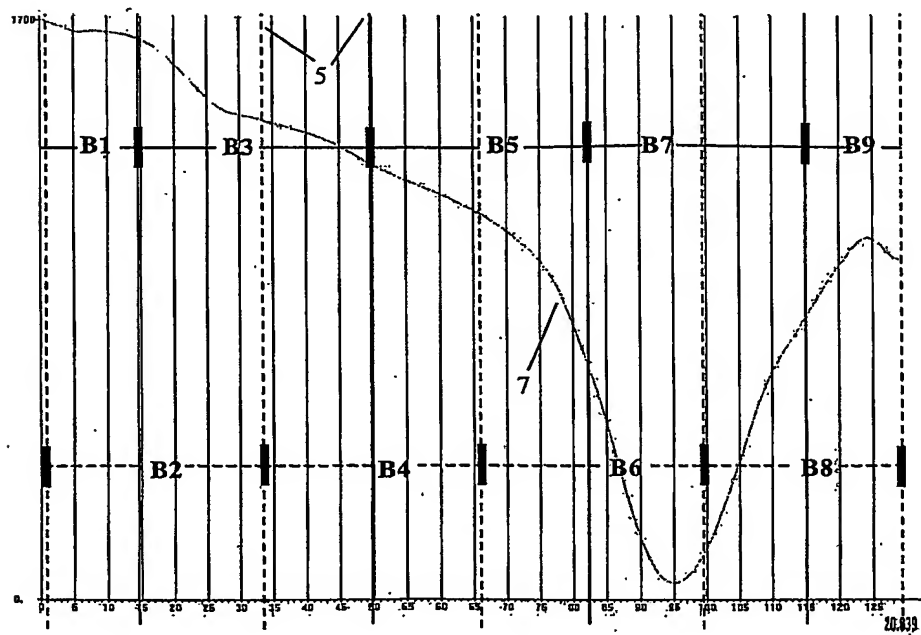




Fig. 11

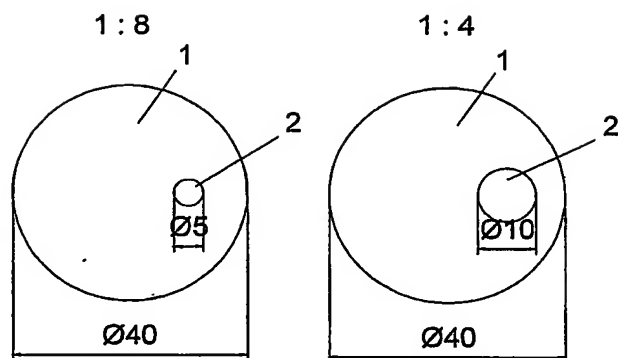
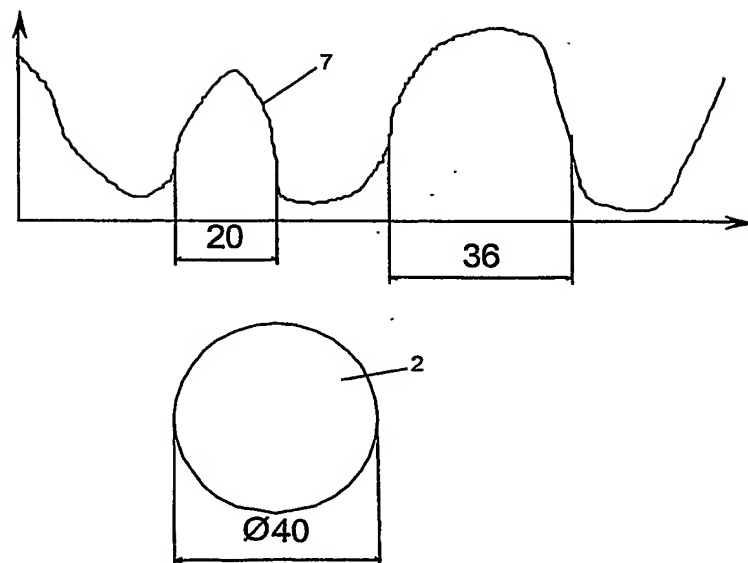


Fig. 12:



7/9

Fig. 13:

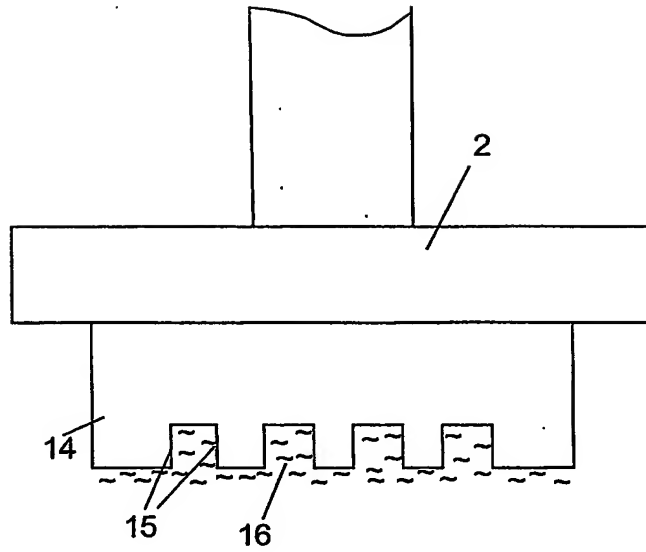
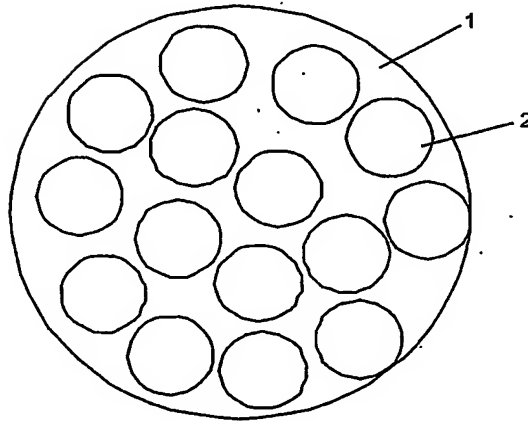


Fig. 14:



8/9

Fig. 15:

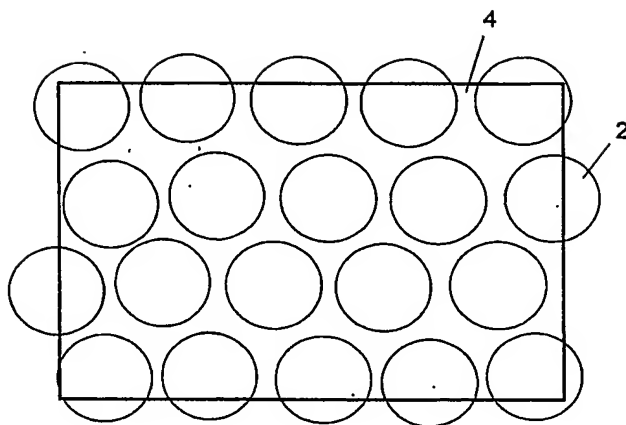
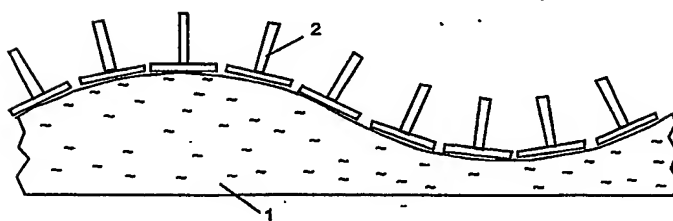


Fig. 16:



9/9

Fig. 17

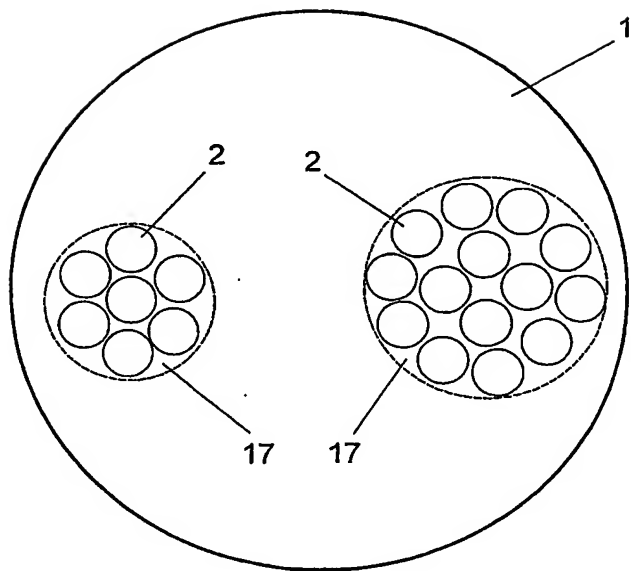


Fig. 18:

